

普通物理学教程丛书

# 力 学

(下册)

郑永令 贾起民 编著

复旦大学出版社



普通物理学教程丛书

# 力 学

(下 册)

郑永令 贾起民 编著

复旦大学出版社

(沪) 新登字202号

## 内 容 提 要

本书是《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者在给复旦大学物理系学生上课时所用的讲义基础上,经过多年实践不断修改而成的。全书十章分为五篇,分别讲述质点力学、质点系力学与守恒定律、刚体与流体、振动与波、相对论等。全书内容清新、层次分明,注意了力学的历史发展及力学同其他学科的联系,可读性和开拓性都很好。

全书分上、下两册出版。下册分刚体与流体、振动与波、相对论等三篇共五章。本书可供综合性大学或工科大学作为普通物理学的力学教科书或主要教学参考书。

## 力 学

(下 册)

郑永令 贾起民 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 常熟市文化印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 14.0625 字数 404,000

1990年9月第1版 1992年10月第2次印刷

印数 3,000—6,000

ISBN 7-309-00955-x/O·114

定价: 6.60 元

# 目 录

(下册)

## 第三篇 刚体与流体

### 第六章 刚体力学

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| § 6.1 刚体运动概述 .....                                              | 3  |
| 刚体 刚体的自由度 刚体运动的几种形式 作用在刚体上的力系<br>及其简化                           |    |
| § 6.2 刚体的定轴转动 .....                                             | 8  |
| 角位移、角速度和角加速度 角量与线量的关系 角速度矢量<br>几点说明 例题                          |    |
| § 6.3 转动定律 .....                                                | 15 |
| 定轴转动刚体的角动量 定轴转动刚体的角动量定理 转动定律<br>转动惯量 *惯量张量和惯量主轴 定轴转动刚体的角动量守恒 例题 |    |
| § 6.4 刚体的平面平行运动 .....                                           | 31 |
| 平面平行运动的运动方程 滚动 瞬时转轴 例题                                          |    |
| * § 6.5 体育运动中的角动量守恒 .....                                       | 46 |
| § 6.6 刚体的能量 .....                                               | 50 |
| 定轴转动刚体的动能及动能定理 作平面平行运动的刚体的动能<br>刚体的重力势能 例题                      |    |
| § 6.7 刚体静力学 .....                                               | 61 |
| 刚体平衡的条件 例题                                                      |    |
| § 6.8 陀螺的运动 .....                                               | 66 |
| 陀螺的进动 地球在太阳(月球)引力矩作用下的进动 回转罗盘<br>*陀螺的章动 例题                      |    |
| 思考题 .....                                                       | 78 |
| 附录 6 A 有限角位移和无限小角位移 .....                                       | 79 |

|         |    |
|---------|----|
| 习题..... | 85 |
|---------|----|

## 第七章 流体力学

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 7.1 流体的定常流动.....            | 97  |
| 描写流体运动的两种方法 定常流动 流线与流管 连续性方程  |     |
| 流体流动形态与参照系的关系 例题              |     |
| § 7.2 流体静力学 .....             | 107 |
| 静止流体内的应力和压强 静止流体的平衡方程 重力场中静止  |     |
| 流体内各点的压强 压强的单位 浮力、浮心和定倾中心 例题  |     |
| § 7.3 伯努利方程及其应用 .....         | 119 |
| 理想流体 伯努利方程 伯努利方程的应用 机翼的升力, 马格 |     |
| 努斯效应 例题                       |     |
| § 7.4 粘滞流体的流动.....            | 132 |
| 流体的粘滞性 粘滞流体的运动规律 粘滞流体在水平圆管内的  |     |
| 流动, 泊肃叶公式 粘度的测量 层流与湍流, 雷诺数 例题 |     |
| • § 7.5 血液的流动.....            | 144 |
| 红细胞的轴向集中 血流速度和血压的分布 例题        |     |
| § 7.6 粘滞流体中运动物体所受的阻力 .....    | 147 |
| 粘滞阻力 压差阻力 斯托克斯公式 一点说明         |     |
| 思考题 .....                     | 151 |
| 习题 .....                      | 154 |

## 第四篇 振动与波

### 第八章 振动

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| § 8.1 简谐振动 .....                | 163 |
| 弹簧振子的振动 简谐振动的频率、振幅和位相 简谐振动的表    |     |
| 示法 单摆 谐振子的能量 例题                 |     |
| § 8.2 振动的合成与分解 .....            | 177 |
| 同方向、同频率两简谐振动的合成 同方向、不同频率两简谐振动的  |     |
| 合成, 拍 互相垂直、同频率两简谐振动的合成 互相垂直、不同频 |     |
| 率两简谐振动的合成, 利萨如图形 振动的分解, 谐波分析 例题 |     |
| § 8.3 阻尼振动 .....                | 188 |
| 运动方程及其解 阻尼振子的能量 品质因数 临界阻尼与过     |     |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 阻尼 例题                                                            | 196 |
| §8.4 受迫振动                                                        | 196 |
| 运动方程及其解 稳态解的振幅、位相与强迫力频率的关系,共振<br>共振峰的锐度 受迫振动中的功、能关系 对任意策动力的响应 例题 |     |
| §8.5 二自由度振动                                                      | 207 |
| 耦合振子的简正模式和简正频率 例题                                                |     |
| * §8.6 非线性振动                                                     | 214 |
| 非线性振动概述 微扰法 受迫振动 例题                                              |     |
| 思考题                                                              | 225 |
| 习题                                                               | 227 |

## 第九章 波

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| §9.1 机械波的形成与传播                                      | 235 |
| 机械波的形成 周期性波的形成,横波与纵波 波长、频率与波速的<br>关系 球面波和平面波        |     |
| §9.2 简谐波                                            | 240 |
| 简谐波的运动学方程 讨论 例题                                     |     |
| §9.3 波动方程与波速                                        | 244 |
| 小球和弹簧模型中的波速 弹性棒中的波动方程与波速 柔软弦<br>中的横波 水面波 相速度与群速度 例题 |     |
| §9.4 波的能量和强度                                        | 260 |
| 波的能量与能量密度 波的强度和功率 声强级 例题                            |     |
| §9.5 波的衍射、反射与折射                                     | 267 |
| 惠更斯原理 波的衍射 波的反射和折射 *弦上横波的反射与<br>透射 能量的反射和透射 例题      |     |
| §9.6 波的叠加 驻波                                        | 275 |
| 波的叠加原理 波的干涉 驻波 简正模式 例题                              |     |
| §9.7 多普勒效应                                          | 289 |
| 波源静止,观察者运动 波源运动,观察者静止 波源和观察者<br>都运动 冲击波 例题          |     |
| * §9.8 非线性波简介                                       | 293 |
| 非线性效应对波动的影响 非线性介质中的脉冲波 孤立波,孤子                       |     |
| 思考题                                                 | 298 |
| 习题                                                  | 300 |

## 第五篇 相 对 论

### 第十章 相对论和相对论力学

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| § 10.1 牛顿时空观和伽里略变换回顾.....                         | 309 |
| 牛顿时空观评述 再论伽里略变换                                   |     |
| § 10.2 狭义相对论的实验背景.....                            | 313 |
| 相对性原理与电磁学 寻找绝对参照系的尝试,迈克尔逊-莫雷实验 对牛顿力学的偏离           |     |
| § 10.3 狭义相对论的基本假设.....                            | 319 |
| 爱因斯坦的基本假设 时间是值得怀疑的 同时性的相对性 时钟的同步问题                |     |
| § 10.4 时间膨胀和长度收缩.....                             | 331 |
| 光信号钟 时间膨胀 长度收缩 时间膨胀、长度收缩与时钟同步的相互关系 例题             |     |
| § 10.5 洛伦兹变换.....                                 | 347 |
| 洛伦兹变换的导出 洛伦兹变换的几个推论 *事件之间的间隔和因果性 例题               |     |
| § 10.6 相对论的速度和加速度变换.....                          | 361 |
| 相对论的速度变换公式 相对论的加速度变换公式                            |     |
| § 10.7 多普勒效应 孪生子佯谬.....                           | 365 |
| 多普勒效应 孪生子佯谬                                       |     |
| § 10.8 相对论的动量和能量.....                             | 374 |
| 相对论动量 相对论中的力 相对论中的能量 能量与动量的关系 静质量为零的粒子 例题         |     |
| § 10.9 质量、动量和力的变换公式 .....                         | 385 |
| 质量的变换公式 动量和能量的变换公式 力的变换公式                         |     |
| § 10.10 广义相对论简介 .....                             | 390 |
| 等效原理 光线在引力场中的弯曲 引力与时间,引力红移 引力和空间,水星的运动 广义相对论的基本原理 |     |
| 思考题 .....                                         | 400 |
| 附录 10 A 爱因斯坦与光量子学说和相对论的创立.....                    | 403 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 习题 .....          | 406 |
| 附录 A 常用矢量公式 ..... | 413 |
| 附录 B 常用数据 .....   | 414 |
| 参考书目 .....        | 415 |
| 习题答案 .....        | 417 |

## 第三篇 刚体与流体

在前两篇中,我们讨论了质点与质点系运动的一般规律,本篇将讨论两种特殊的质点系:刚体与流体。作为质点系,它们当然遵循质点系力学的基本规律,即动量定理、功能定理、角动量定理和相应的守恒定律;将这些规律与这两种质点系本身所具有的特殊性质相结合,将呈现特殊的形式。因此,掌握基本规律的一般性和所讨论质点系的特殊性的关系,是学习本篇的关键。



## 第六章 刚体力学

### § 6.1 刚体运动概述

#### 一、刚体

所谓刚体,是指整体及其各部分的形状和大小均保持不变的物体,也就是各质点(或质元)间的距离均保持不变的质点系。刚体是实际物体(指固体)的一种抽象。实际物体在外力作用下,其形状和大小或多或少会有一些变化,但只要这种变化与物体的几何线度相比很小,对所讨论的问题的影响可以忽略,我们就可把这物体看成刚体。这里重要的是变化的相对线度和对所讨论问题的影响。两个钢球,当我们讨论它们碰撞瞬时的能量转换时,尽管形变很小,但必须把它们看成弹性体,因为碰撞时必有一部分能量以弹性势能的形式存在于球中;一根橡胶棒,当我们以一端为支点把它悬挂起来而讨论它的摆动时,却可以忽略其形变而把它看成刚体。

#### 二、刚体的自由度

为了确定一个质点在空间的位置,需要三个独立的坐标变数,如直角坐标  $x, y, z$ , 或柱坐标  $\rho, \varphi, z$ , 球坐标  $r, \theta, \varphi$ 。为了确定二个自由质点所组成的体系在空间的几何位形,就需要六个独立坐标变数。我们把确定一个力学体系在空间的几何位形所需的独立变数的个数称为自由度。一般而言,由  $N$  个自由质点组成的体系有  $3N$  个自由度。但当质点的运动受到某种约束时,自由度就会减少。例如当一个质点限制在平面上运动时,只要二个独立坐标就可确定其位置,因而其自由度为 2。对于距离保持不变的二质点体系,由于两个质点间距离

$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} = l$  恒定不变, 6 个坐标中只有 5 个是独立的, 因而该体系只有 5 个自由度。这也可理解为: 先用 3 个坐标确定第一个质点的位置, 这时, 第二个质点, 可位于以第一个质点为球心、以  $l$  为半径的球面上的任一点, 为确定它的位置, 需用两个独立坐标确定它与第一个质点连线的方位, 因而该体系只有 5 个自由度。对于彼此距离保持不变的 3 个不共线质点体系, 由于有每两个质点间距离保持不变的 3 个约束联系, 自由度从 9 个减为 6 个。这也可这样理解: 当用 5 个独立变数确定两个质点的位置以后, 与这两个质点距离一定的第三个质点可位于以这两个质点连线为轴的圆周上的任一点, 这时只要用一个方位角就能确定其位置, 故该 3 质点体系的自由度为 6。

刚体由无数个质点组成, 但由于各质点间的距离保持不变, 因而确定刚体几何位形的变数只要 6 个。这是因为, 只要刚体上任意三个不共线的点的位置确定, 整个刚体的位置也就确定, 因而刚体的自由度与上述 3 质点系统的自由度相同。这 6 个变数当然也可理解为确定刚体上某一点(例如质心)位置的 3 个变数、确定刚体上过该点的一轴线的方位的 2 个变数及刚体绕该轴转动角度的 1 个变数。

### 三、刚体运动的几种形式

由于受到不同的约束, 刚体可以有各种运动形式, 每种运动形式对应的自由度也不相同。

(1) 平动 作平动时, 刚体上每一点的运动情况完全相同, 刚体的运动可用一质点来代表, 因而这种运动的描述与质点相同。其自由度为 3。

(2) 定轴转动 当刚体上(刚体外与刚体刚性固连的点可视为在刚体上)某两点固定时, 刚体只能绕着过这两点的固定轴转动, 这种运动称为刚体的定轴转动。显然, 定轴转动只有一个自由度。

(3) 平面平行运动 刚体在运动过程中, 其上每一点都在与某固定平面相平行的平面内运动, 这种运动称为刚体的平面平行运动。这时, 刚体内任一与固定平面相垂直的直线上所有点的运动情况完全相

同,因而刚体的运动可用与固定平面相平行的任一截面的运动来代表,而该截面在通过自身平面内的运动可以看成其上任一点  $A$  (称为基点) 在平面上的移动与该截面绕过该点且垂直于平面的轴线的转动的组合 (图 6.1-1)。在与基点相对静止的参照系上,刚体的运动成为绕过基点的固定轴的转动,即定轴转动。显然,平面平行运动的自由度为 3。

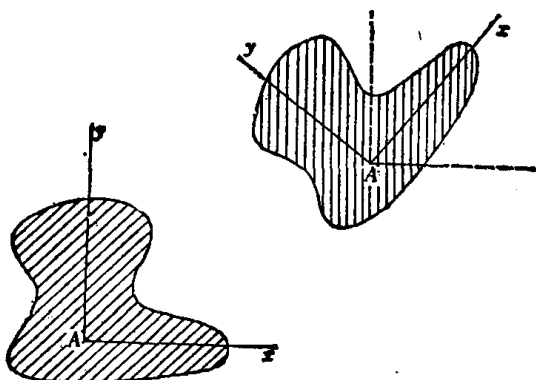


图 6.1-1 刚体的平面平行运动可看作其上一点  $A$  的平面运动与绕过  $A$  点轴线的定轴转动的组合

(4) 定点转动 当刚体上某一点固定时,刚体只能绕这点转动,这种运动称为刚体的定点转动。可以证明,作定点转动的刚体,在任一瞬时,总可看成绕通过该定点的某一瞬时轴的转动(下一瞬时则为绕另一瞬时轴的转动)。不难看出,定点转动的自由度为 3。

(5) 一般运动 刚体的一般运动可以看成随刚体上某一基点  $A$  (例如质心)的移动和绕该点的转动的组合。在与基点相对静止的参照系上,绕该点的转动即为定点转动。因此,作一般运动的刚体的自由度为 6。

由以上分析可见,平动和定轴转动是刚体最基本的运动形式。平动与质点的运动相当,不必另加讨论。所以我们将在下节着重讨论刚体定轴转动的运动学描述。

#### 四、作用在刚体上的力系及其简化

刚体的各种形式的运动,是与外力的作用密切相关的。刚体的

内力使刚体各质元之间保持刚性连结，在研究刚体的外观运动时不必考察其作用。不同运动形式下外力与运动的具体关系，将在各有关章节中讨论，这里先就作用在刚体上的力作些总的说明。

(1) 作用在刚体上的力是滑移矢量。力有大小、方向、作用点三个要素。就它对物体所产生的效果而言，三者都起作用。因而，在一般情况下，即使保持大小和方向不变，力亦不能平移，因为这将造成作用点的变动，效果就将不同。这就是说，力不像速度、加速度那样是自由矢量。但由于刚体是一个刚性整体，当力沿着作用线在刚体上滑移时，对刚体的作用不变，因而称作用在刚体上的力为滑移矢量。

(2) 合力存在的条件。刚体作为一个刚性整体，与一般质点系不同，作用其上的诸力的合力（即与诸个力作用完全等效的一个力）是有意义的。但合力只在诸分力属下列几种情况下存在：

1) 共点力系 所有力的作用线（或其延长线）交于一点的力系称为共点力系。显然，这样的力系可以等效为大小和方向等于诸力矢量和、作用点就是该交点的一个力，这就是合力。

2) 平行力系 所有的力都互相平行的力系称为平行力系。这样的力系一般也存在合力。为简单起见，先考虑两个平行力的合力。如图 6.1-2 所示，平行力  $F_1$  和  $F_2$  作用在刚体上的  $A$ 、 $B$  两点。为求合力，设想在  $A$ 、 $B$  上各施加一对沿  $\overline{AB}$  的等值反向的力  $f$  和  $-f$ ，由于力是滑移矢量，这一对力的作用与它们作用于同一点相同，因而对刚体运动不会有影响。 $F_1$  与  $-f$  的合力  $F'_1$ 、 $F_2$  与  $f$  的合力  $F'_2$  两者互不平行，它们的作用线必交于某一点  $D$ ，它们的合力  $F$  也就是  $F'_1$  和  $F'_2$  的合力，即  $F = F'_1 + F'_2$ 。 $F$  的作用线交于  $\overline{AB}$  上的  $C$ ，且有  $\overline{AC}/\overline{CB} = F_2/F_1$ 。用类似方法，可以求任意多个平行力的合力。如果诸力的矢量和为零，这样的平行力系就成为一个力偶。

由上面的讨论不难看出，当作用在各质元上的平行力的大小与质元质量成正比时，合力的作用线通过质心，因而通常说刚体重力的合力作用在质心上。此结果与一般质点系中重力对质心的总力矩为零相一致，尽管在质点系为非刚体情况下，合力并不存在。

3) 共面力系 所有力的作用线位于同一平面的力系称共面力系。

若共面力系的诸力互相平行, 则可按求平行力合力的方法求出合力。若诸力不平行, 则必有交点, 可直接依次求出合力。

(3) 一般力系可等效为一个力和一个力偶。以两个力为例, 如果两个力不互相平行, 又不共面, 这两个力就不能等效为一个合力。比如图 6.1-3 中, 作用于  $A$  点的力  $F_1$  位于  $yz$  平面, 作用于  $B$  点的力  $F_2$  位于

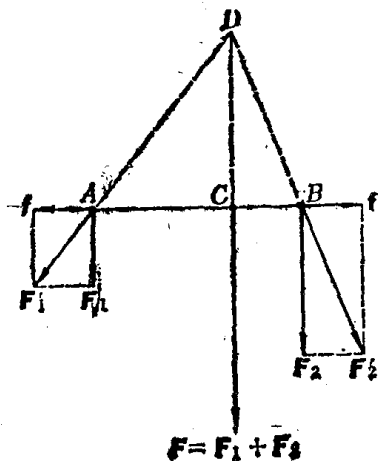


图 6.1-2 求平行力的合力

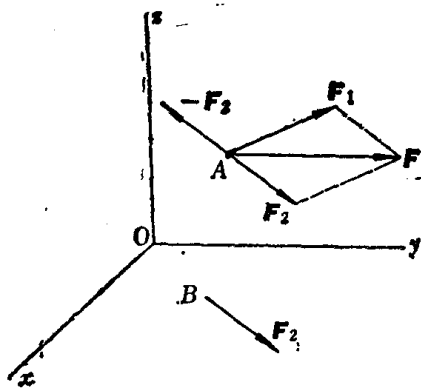


图 6.1-3 两个异面力可等效为一个合力和一个力偶

$xy$  平面, 这样的两个异面力就属这种情形。但我们可设想在  $A$  点作用一对力  $F_2$ 、 $-F_2$ , 这不会影响刚体的运动。于是, 作用在  $A$  点的力  $F_1$  和  $F_2$  构成一个合力  $F = F_1 + F_2$ , 而剩下的作用在  $B$  点的力  $F_2$  和作用在  $A$  点的力  $-F_2$  则构成一个力偶, 其力偶矩就是  $F_2$  对于  $A$  点的力矩。不难看出,  $F_1, F_2$  也可等效为作用在其他任一点  $C$  的一个力  $F = F_1 + F_2$  和一个力偶, 其力偶矩就是  $F_1, F_2$  对  $C$  点的力矩的矢量和。这样, 当作用于刚体上某一点的力平移到另一点时, 必须同时伴随一个力偶, 因此任意个力组成的力系可等效为作用于刚体上某一点  $C$  的单个力  $F$  和一力偶矩  $\tau$ , 其中  $F = \sum_i F_i$  为外力的矢量和,  $\tau = \sum_i \tau_i$  为外力对点  $C$  的力矩的矢量和。点  $C$  称为简化中心。简化中心虽可任意选取, 但当  $C$  改变位置时,  $\tau$  也随之改变。因力偶的作用只与力偶的矩有关, 所以我们可以刚体上相当自由地选择具有确

定力偶矩的一对力的大小、方向和作用点。对于方向与力  $\boldsymbol{F}$  垂直

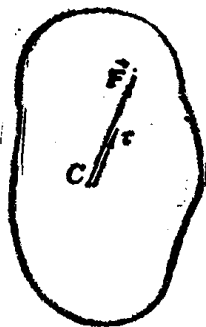


图 6.1-4 作用在刚体上的任意力系可等效为一组力螺旋

的力偶矩，可看成一对与力  $\boldsymbol{F}$  共面的力，而这 3 个力又可重新构成一个新的合力；对于方向与力  $\boldsymbol{F}$  构成任意角度的力偶矩，可将其分解为两个方向相互垂直的力偶矩，一个力偶矩与力  $\boldsymbol{F}$  平行，另一个力偶矩与力  $\boldsymbol{F}$  垂直，后者与力  $\boldsymbol{F}$  可构成一个新的合力。综上所述，作用在刚体上的任何力系，最终可以等效为一个作用于刚体上某一点的力和一个力偶矩方向与之平行的力偶。这样的一组力和力偶称为偶力组或力螺旋（图 6.1-4）。当力偶矩为零时，力系等效为一个合力。

由此可见，作用在刚体上的力系一般总可等效为一个作用于某一点  $C$  的力  $\boldsymbol{F}$  和方向与之平行的力偶矩  $\boldsymbol{\tau}$  的组合，即力螺旋。只有在相应力偶矩  $\boldsymbol{\tau} = 0$  的情况下，力系才可等效为一个合力。力系是否可等效为一个合力是有条件的。

## § 6.2 刚体的定轴转动

### 一、角位移、角速度和角加速度

当刚体绕固定轴转动时，刚体上各点将沿不同半径的圆周运动，这些圆的圆心都在固定轴上，圆周所在的平面都与轴线垂直。这时，刚体内各点的位移、速度和加速度都不相同，但是刚体上各点到转轴的垂直线在同样的时间内所转过的角度  $\Delta\varphi$  都相同，适当选择  $\varphi$  的零点，就可用转角  $\varphi(t)$  描写刚体的定轴转动。在  $\Delta t$  时间内刚体所转过的角度  $\Delta\varphi$  叫角位移（图 6.2-1）。

在  $t$  到  $t + \Delta t$  时间内的角位移  $\Delta\varphi$  与  $\Delta t$  之比称为刚体的平均角速度，用  $\overline{\omega}$  表示：

$$\overline{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 平均角速度的极限称为瞬时角速度, 简称角速度, 用  $\omega$  表示:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (6.2-1)$$

刚体的定轴转动有两种不同的转动方向, 当我们顺着转轴观察时, 刚体可以按顺时针方向转动, 也可以按逆时针方向转动。如果把一种转向的角速度取为正的, 另一种转向的角速度取为负的, 则角速度的大小反映了定轴转动的快慢, 角速度的正负描写了定轴转动的方向。角速度的单位是弧度/秒。

在  $\Delta t$  时间内, 角速度的改变  $\Delta\omega$  与  $\Delta t$  之比称为该段时间内的平均角加速度, 用  $\overline{\beta}$  表示:

$$\overline{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

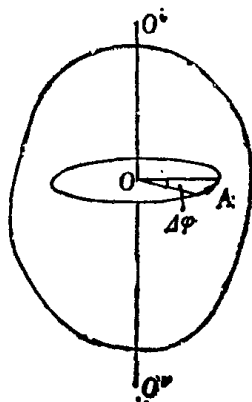


图 6.2-1 定轴转动刚体的角位移

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 平均角加速度的极限称为瞬时角加速度, 简称角加速度, 用  $\beta$  表示:

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (6.2-2)$$

当  $\omega$  与  $\beta$  同号时表示转动逐渐加快,  $\omega$  与  $\beta$  异号时表示转动逐渐减慢。角加速度的单位是弧度/秒<sup>2</sup>。

由以上讨论可知, 刚体的定轴转动与质点的直线运动相似, 都属一个自由度的运动, 只要在描写质点直线运动各物理量(位移、速度、加速度)前加一个“角”字, 就成了描写刚体定轴转动的各相应物理量(角位移、角速度、角加速度), 两者的运动学关系亦完全相似:

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| 定轴转动                            | 直线运动                 |
| $\omega = \frac{d\varphi}{dt},$ | $v = \frac{dx}{dt},$ |